

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE SONORA NAS CAPELAS DA RECONCILIAÇÃO NO EDIFÍCIO DA NOVA IGREJA DO SANTUÁRIO DE FÁTIMA

Diogo Mateus¹, Paulo Santos¹, Rui Calejo², Vítor Abrantes²

¹ Departamento de Eng. Civil, Universidade de Coimbra, Pólo II, 3030 - 788 Coimbra, Portugal.
{diogo@dec.uc.pt, pfsantos@dec.uc.pt}

² Departamento de Eng. Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
{calejo@fe.up.pt, abranes@fe.up.pt}

Resumo

O novo edifício da Igreja da Santíssima Trindade em Fátima, para além da igreja principal com capacidade para cerca de 9000 lugares sentados, é constituído, entre outros espaços, por três capelas da reconciliação, localizadas no piso -1. Duas destas capelas, com capacidade para cerca de 120 lugares sentados cada, apresentam uma geometria e aspecto de acabamentos muito semelhante entre si, com a diferença que uma delas é muito mais reverberante que a outra. Em termos construtivos, a diferença reside nas características de absorção sonora do revestimento interior das paredes e tecto.

No presente artigo, são apresentados e analisados os resultados mais relevantes dos ensaios acústicos efectuados nas duas capelas, quer os registados durante a fase de construção, antes da aplicação de revestimentos e mobiliário, quer os registados após a abertura ao público destes espaços. Entre os parâmetros avaliados, destacam-se os reflectogramas, tempos de reverberação, índice *RASTI*, *Definição* e *Níveis de Ruído de Fundo*. Os resultados destes parâmetros, obtidos através de medições acústicas *in situ*, serão ainda comparados com os resultados obtidos na modelação em fase de projecto.

Palavras-chave: reverberação, decaimento, qualidade sonora, inteligibilidade.

Abstract

The new building of “Santíssima Trindade” church in Fátima (Portugal) has, in addition to the main church with seating capacity for 9000 people, three chapels of reconciliation on floor -1. Two of these chapels, each of which seats about 120, have a very similar geometry and finish; although one is much more reverberating than the other. From the construction point of view, the difference is in the sound absorption characteristics of the interior coatings of the walls and ceiling.

This paper presents and analyses the most relevant results of the acoustic tests carried out in these two chapels, including the findings recorded at construction stage before the coatings were applied and furniture installed, and those recorded after the public opening of the chapels. Among the analysed parameters are the reflectograms, the reverberation time, *RASTI* index, definition and background noise levels. The results of these parameters, obtained through *in situ* noise measurements, will be compared with results predicted at the design stage.

Keywords: reverberation, decay, acoustic quality, intelligibility.

1 Introdução

A qualidade acústica de espaços fechados pode ser avaliada com base num conjunto alargado de parâmetros, que procuram, de alguma forma, quantificar a resposta subjectiva dos utentes desses espaços. Grande parte destes parâmetros, habitualmente designados de “parâmetros de qualidade sonora”, pode ser avaliada, quer em fase de projecto, quer através de medições acústicas *in situ*. Na fase de projecto, a determinação destes parâmetros poderá ser obtida recorrendo à modelação numérica, nomeadamente ao modelo “Ray Tracing”, através da utilização de programas de cálculo automático. Durante, ou após, a construção destes espaços (na presente situação, com o objectivo de atempadamente validar os modelos utilizados), é também possível caracterizar o campo sonoro que se estabelece no seu interior e determinar os referidos parâmetros de qualidade sonora, nomeadamente através dos procedimentos indicados na Norma ISO 3382:1997 [1].

Sem se pretender ser demasiado exaustivo, apresentam-se de seguida alguns dos “parâmetros de qualidade sonora” considerados mais relevantes, no presente estudo [1,2,3].

Reverberação (T_r) - O tempo de reverberação define-se como sendo o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora, num recinto fechado, diminua 60 dB, após a interrupção da emissão sonora. Na presente situação, este parâmetro foi calculado com base no decaimento de energia sonora entre -5 dB e -35 dB, e extrapolado para 60 dB de decaimento (T_{30}). Para além de T_r é também apresentado o parâmetro T, que corresponde ao valor médio obtido a partir das bandas de oitava de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Tempo de reverberação mais cedo (EDT) - O tempo de reverberação mais cedo corresponde ao tempo de reverberação determinado para os primeiros 10 dB de decaimento do som, igualmente extrapolado para um decaimento de 60 dB. Este parâmetro é comparável ao T_{30} e permite estimar a relação entre a energia sonora resultante, imediatamente após o som ser emitido e a energia global. Permitindo assim avaliar o efeito das primeiras reflexões, que são as mais percebidas pelos ouvintes.

Inteligibilidade de Palavra "RASTI" - Índice de transmissão rápida de linguagem, que utiliza uma escala que varia de 0 a 100%, onde o “0” corresponde a uma inteligibilidade nula enquanto que o valor “100” corresponde a uma inteligibilidade perfeita (na prática ambas inatingíveis). De uma forma simplista pode considerar-se que este índice identifica a percentagem de sílabas realmente perceptíveis numa dada emissão da palavra. Na realidade este parâmetro é obtido com recurso a uma fonte que emite um sinal modulado e um receptor que analisa a distorção desse mesmo som.

Definição (D50) - Parâmetro determinado através da relação entre a energia registada nos primeiros 50 mseg (som directo e primeiras reflexões) e a energia total. Este valor é expresso em percentagem (ou eventualmente numa escala de 0 a 1) e quanto maior for melhor será a inteligibilidade da palavra.

Reflectograma - Gráfico com a curva de decaimento dos níveis sonoros, em dB, no domínio do tempo, provocados pela chegada do som directo e das primeiras reflexões, determinado a partir de estímulos impulsivos. No presente trabalho, estas curvas foram determinadas por bandas de oitava entre as frequências centrais de 125 e 4000 Hz, e representadas no domínio do tempo com um intervalo Δt próximo de 1 ms.

Curvas NC/NR - Caracterização dos níveis de ruído de fundo admissíveis para cada tipo de local através de valor único, determinado com base nas curvas NC (Noise Criteria) ou NR (parâmetro mais comum na Europa). Estas curvas estabelecem os níveis de ruído de fundo máximos que não podem ser ultrapassados, na ausência de quaisquer actividades internas a um espaço, mas com os sistemas AVAC ou outros equipamentos mecânicos em funcionamento.

Nível de avaliação LAr - Nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular de equipamentos, ao qual é descontada a componente de ruído residual, e se aplicam eventuais correcções devidas à existência de características tonais e/ou impulsivas do ruído particular.

O presente artigo surge na sequência de um trabalho mais alargado, de avaliação e controlo da acústica e dos sistemas electroacústicos, que se estendeu à globalidade dos espaços do novo edifício da Igreja da Santíssima Trindade, quer durante a fase de construção, quer após a abertura ao público dos diversos espaços do edifício. Pela importância e requisitos exigidos, foi dado especial destaque à igreja principal (designado de Grande Espaço Coberto para Assembleias - GECA), onde foram realizadas quatro campanhas de medições acústicas: uma primeira realizada após a conclusão da estrutura do edifício (lajes de piso e de tecto e paredes), ainda com vãos abertos, e sem qualquer tipo de revestimento aplicado (em Junho de 2006); duas intermédias, realizadas já com parte dos revestimentos de parede e de tecto aplicados, mas ainda com alguns vãos abertos (em Março e Abril de 2007); e uma campanha de medições finais, muito mais extensa que as anteriores, cobrindo a generalidade dos espaços do edifício, incluindo zonas técnicas exteriores (realizada em Maio de 2008). Nas capelas objecto deste artigo, foram efectuadas apenas duas campanhas de medições: em Junho de 2006, com a estrutura (piso, paredes e tecto) em betão concluída e os vãos abertos; e em Maio de 2008, após a abertura ao público destes espaços. As medições acústicas realizadas durante a construção tiveram como objectivo principal a validação e ajuste das simulações efectuadas em fase de projecto (que foram naturalmente ajustadas as condições de obra) e permitir eventuais correcções, na fase seguinte de construção (acabamentos), com vista à obtenção de níveis de conforto acústico elevados. Na primeira campanha de medições, tendo em conta que apenas se encontrava executada a estrutura e os painéis pré-fabricados do tecto, no caso do GECA, existindo vãos abertos (em muitos casos, de grande dimensão), foi dado especial destaque à determinação de reflectogramas, no GECA e nas três capelas do edifício (Capelas 1 + 2, Capela 3 e Capela 4). Após a conclusão das obras e da aplicação de mobiliário e equipamento de apoio, incluindo o sistema electroacústico, as medições realizadas tiveram como objectivo principal a caracterização do comportamento acústico do edifício, através da avaliação de parâmetros específicos, cuja medição se encontrava prevista em fase de concurso da obra, e posteriormente a comparação com os requisitos acústicos específicos definidos em fase de projecto.

No presente artigo, apenas são apresentados os resultados obtidos nas Capelas 3 e 4, com capacidade para cerca de 120 lugares sentados, que apresentam uma geometria e um aspecto de acabamento interior muito semelhante entre si, mas com características de reverberação distintas. Os resultados das medições acústicas, apresentados neste artigo, são ainda comparados com os resultados obtidos na modelação em fase de projecto e com os requisitos de projecto.

O projecto de condicionamento acústico (acústica geral) foi desenvolvido nas empresas “VÍTOR ABRANTES - Consultoria e Projectos de Engenharia, Lda.” e “SOPSEC - Sociedade de Prestação de Serviços de Engenharia Civil, S.A.”. As medições acústicas, cujos resultados mais relevantes, das Capelas 3 e 4, se apresentam neste trabalho, foram efectuadas através do laboratório de ensaios “CONTRARUÍDO – Acústica e Controlo de Ruído”.

2 Disposições legais e requisitos acústicos de projecto

A regulamentação existente em vigor, no que respeita às condições acústicas, é apresentada no Regulamento Geral do Ruído (RGR), cuja versão actual foi publicada no Dec. Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro (à data da elaboração do projecto, encontrava-se em vigor o Dec. Lei n.º 292/2000 de 14 de Novembro). Este regulamento, quer na versão actual, quer na versão anterior, define de uma forma global uma política de prevenção e combate ao ruído, tendo em vista a salvaguarda da saúde e o bem estar das populações.

No que se refere aos requisitos técnico-funcionais dos edifícios, encontra-se actualmente em vigor o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE, aprovado pelo Dec. Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio, e actualmente, com a nova redacção dada pelo Dec. Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho).

Na presente situação, para além dos requisitos impostos pelo RGR e pelo RRAE, enquadrando o edifício na tipologia de Edifícios Comerciais, Industriais ou de Serviços (de acordo com o artigo 6º do RRAE), foram considerados os requisitos propostos pelo promotor, em particular para o GECA, e ainda requisitos adicionais propostos pelos projectistas de acústica. Relativamente às capelas, foram considerados em fase de projecto os seguintes requisitos gerais:

- $D_{n,w} \geq 65$ dB e $L'_{n,w} \leq 40$ dB, entre zonas técnicas e as capelas;
- $D_{n,w} \geq 48$ dB e $L'_{n,w} \leq 55$ dB, entre espaços comuns e as capelas;
- $L_{Aeq} \leq 30$ dB(A) e $NC \leq 25$ dB;
- $RASTI > 50\%$;
- $T \approx 1,1$ s para a Capela 4 e $T \approx 2,8$ s para a Capela 3.

Como forma de controlar e garantir o cumprimento destes requisitos (e de outros para os restantes espaços do edifício, com especial destaque para o GECA), foi previsto em caderno de encargos a realização de medições acústicas, quer durante a fase de construção, quer após a conclusão das obras e a aplicação de mobiliário.

3 Características dos espaços em estudo / Medições acústicas

As Capelas 3 e 4 (números atribuídos em fase de projecto) localizam-se no piso inferior do edifício da nova igreja do Santuário, na chamada Zona da Reconciliação. Cada uma destas capelas tem uma capacidade para cerca de 120 lugares sentados. As capelas apresentam uma geometria e aspecto de acabamentos muito semelhante entre si (ver Figuras 1 e 2), apesar das características de absorção dos revestimentos de tectos e de paredes serem completamente diferentes. Na Capela 3 as paredes e tectos são revestidas com painéis de gesso cartonado lisos, enquanto que na Capela 4 estes elementos são revestidos com painéis fonoabsorventes de fibras de madeira aglomeradas com uma espessura de 17 mm, do tipo “AKUSTAPLAN”, materializando uma caixa de ar com espessura não inferior a 20 mm, parcialmente preenchida com lã de rocha. Para evitar o paralelismo entre paredes das capelas, com vista a minimizar os efeitos desfavoráveis das reflexões múltiplas entre paredes (especialmente importante na Capela 3, onde os revestimentos são muito pouco absorventes), os painéis de revestimento de paredes foram aplicados com inclinação na vertical, fazendo variar a espessura da caixa de ar (com a espessura mínima da caixa de ar junto ao pavimento e máxima junto ao tecto).

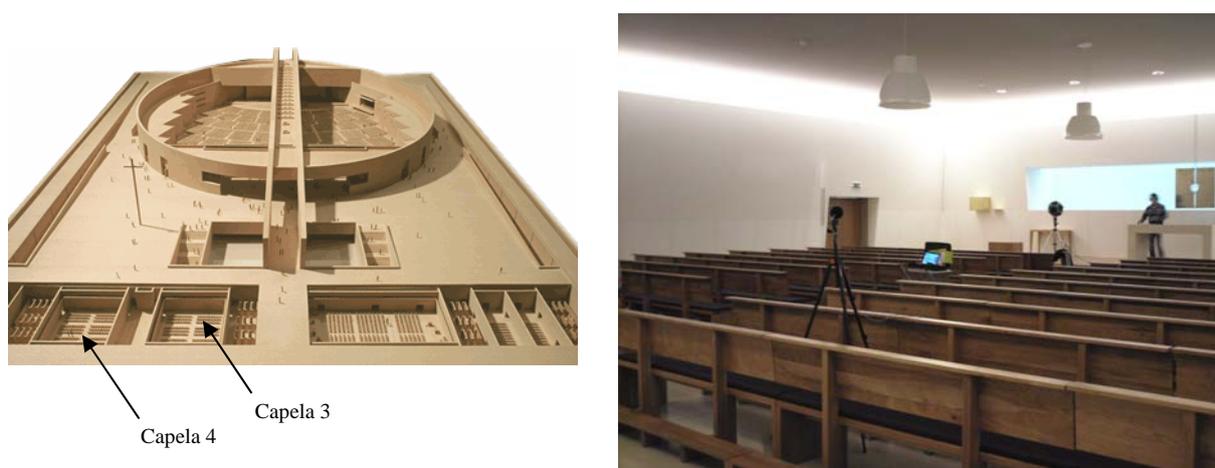


Figura 1 – Localização das capelas na maqueta do edifício da nova Igreja e imagem recolhida na Capela 3 durante as medições acústicas.

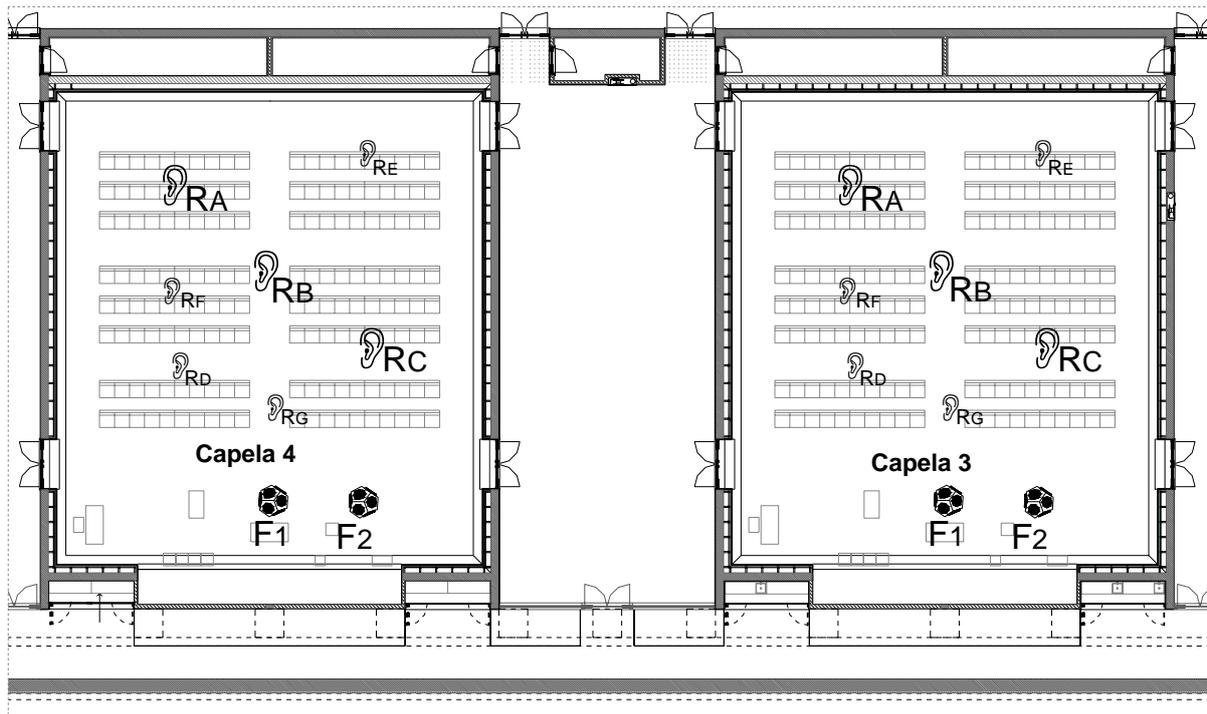


Figura 2 – Planta das Capelas 3 e 4 e espaço comum adjacente, com indicação das posições de fonte sonora (F1 e F2) e de receptores considerados (RA a RG).

O equipamento utilizado nas medições acústicas foi o seguinte: analisador portátil (modelo “Symphonie - 01dB-Stell”, ligado a um PC portátil, com a aquisição e o tratamento através do software “dBati32 - 01dB-Stell”), uma fonte de ruído impulsiva e uma fonte Omni-direccional, Dodecaédrica, modelo “DO12 - 01dB-Stell”. Na última campanha de medições acústicas, foi ainda utilizado o próprio sistema electroacústico de cada espaço (amplificação e saída de som), através da técnica de correlação “sequências de Comprimento Máximo” (Maximum Length Sequences – MLS), com sinal gerado a partir do sistema de aquisição (Symphonie). Para obtenção dos reflectogramas, dadas as limitações do software de aquisição e tratamento utilizado, os resultados finais foram obtidos a partir de gravações de sinal áudio, ao qual, posteriormente, foi aplicada a transformada rápida de Fourier (FFT) e obtido o sinal correspondente no domínio da frequência. A este sinal, foram aplicados filtros do tipo Band-pass (filtros “Butterworth”, em oitavas), e posteriormente aplicada a transformada rápida inversa de Fourier, para obtenção do sinal no tempo, filtrado por bandas de oitava. Finalmente, foram determinados os reflectogramas, em dB com intervalos Δt próximos de 1 ms.

Em fase de projecto e durante a construção do edifício, nas validações e correcções ao projecto inicial, o modelo de cálculo utilizado na avaliação do condicionamento acústico interior das capelas e do GECA foi o “Ray Tracing”, através da utilização do programa de cálculo automático “CATT-Acoustics”.

4 Resultados obtidos

Tal como já referido, durante a fase de construção, após a conclusão da estrutura (lajes de piso e de tecto e paredes), foram efectuadas medições acústicas nas capelas (nessa altura apenas na Capela 3, visto que a Capela 4 se encontrava em condições idênticas), cujos resultados médios, dos tempos de reverberação, Definição e *RASTI* se apresentam nas Figuras 3 e 5. Após a conclusão das obras, e aplicação de mobiliário, foram efectuados novamente ensaios, do mesmo tipo, mas agora em ambas as capelas, cujos resultados se apresentam conjuntamente com os anteriores nas Figuras 3 e 5 e em separado na Figura 4. Nas Figuras 6 a 8 são apresentados os resultados dos reflectogramas obtidos no ponto RB (zona central das capelas) para a banda de oitava de 500 Hz, durante a construção, na Capela 3, e após construção nas Capelas 3 e 4.

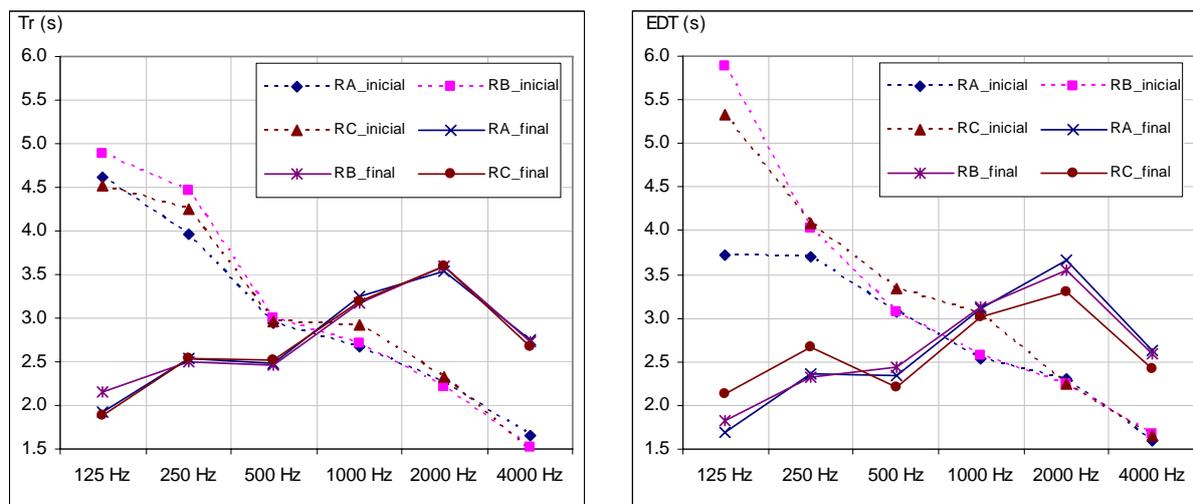


Figura 3 – Tempos de reverberação médios, Tr e EDT, nos pontos RA, RB e RC, obtidos na Capela 3 durante a fase de construção e após abertura do espaço ao público.

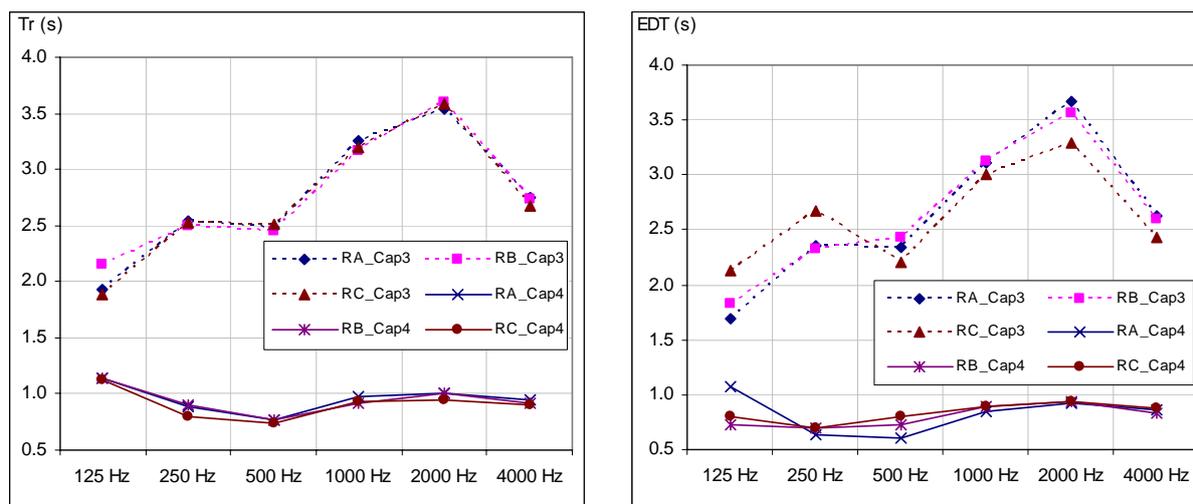


Figura 4 – Tempos de reverberação médios, Tr e EDT, nos pontos RA, RB e RC, obtidos respectivamente nas Capelas 3 e 4, obtidos após abertura do espaço ao público.

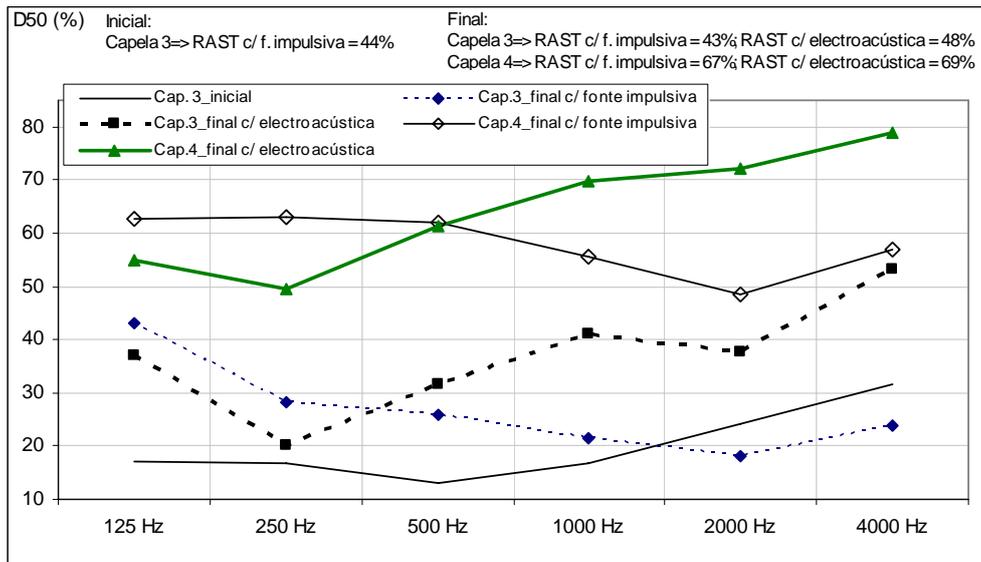


Figura 5 – Valores médios de *RASTI* e *D50*, obtidos na Capela 3, durante e após construção, e nas Capelas 3 e 4, obtidos após abertura do espaço ao público.

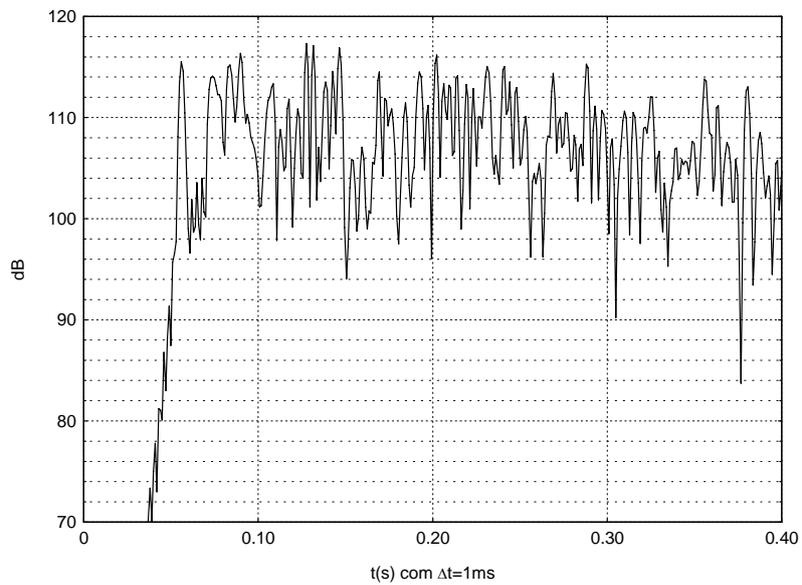


Figura 6 – Reflectograma obtido, no ponto RB, na fase de construção, na Capela 3 (com a envolvente em betão armado concluída, sem qualquer tipo de acabamento, e vãos abertos).

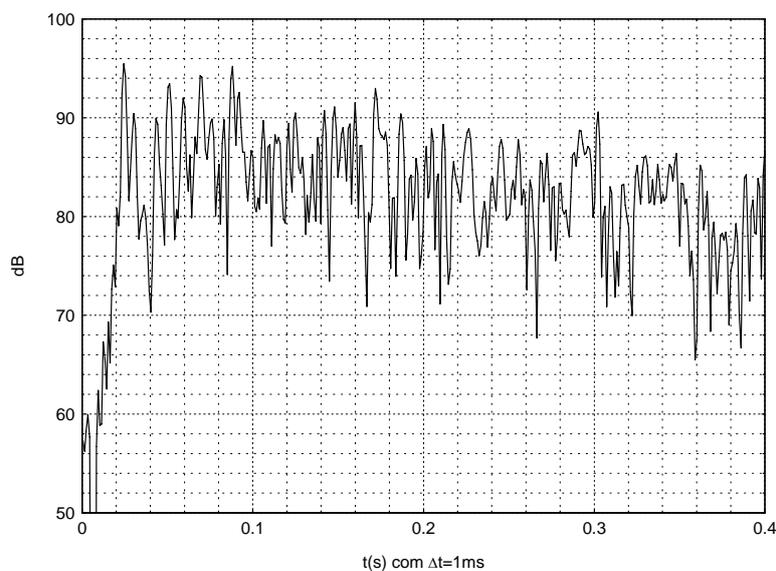


Figura 7 – Reflectograma obtido, no ponto RB, para as condições finais de utilização na Capela 3.

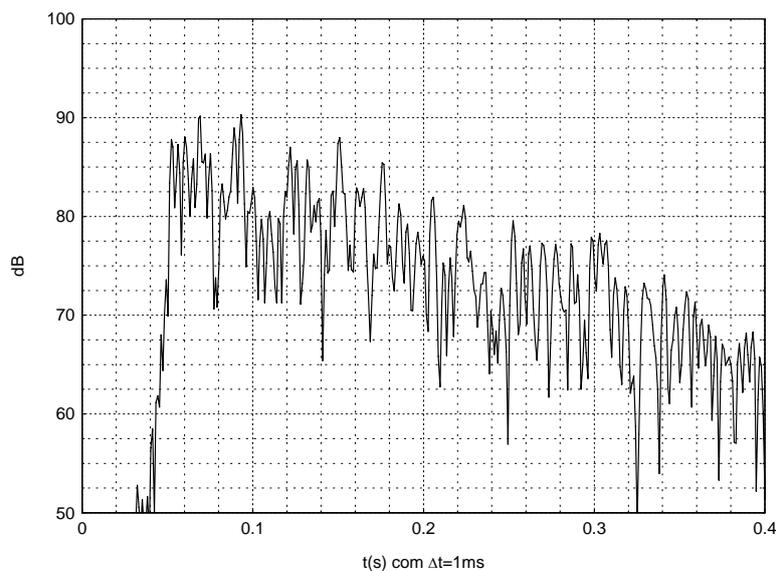


Figura 8 – Reflectograma obtido, no ponto RB, para as condições finais de utilização na Capela 4.

Das medições de ruído ambiente no interior das Capelas 3 e 4, com e sem equipamento AVAC em funcionamento, obtiveram-se valores de LAr e de NC dados por: $LAr=27\text{ dB}(A)$ e $NC25$, para a Capela 3; e $LAr=18\text{ dB}(A)$ e $NC15$, para a Capela 4. Foram também efectuadas medições de isolamento sonoro, nomeadamente entre as zonas de circulação comum e a Capela 1+2 (situação mais desfavorável, por existir neste caso acesso directo entre a zona de circulação e a capela), de onde resultou um índice de isolamento sonoro bruto, Dw , próximo de 47 dB, e entre o átrio comum às Capelas 3 e 4 e o interior da Capela 3 (capela receptora mais desfavorável), de onde resultou um índice de isolamento sonoro bruto, Dw , próximo de 30 dB.

Nas Figuras 9 a 11, são apresentados, como exemplo, alguns dos resultados obtidos em fase de projecto, através do programa de cálculo automático “CATT-Acoustics”. Na Figura 12, são apresentados os valores de Tr e de EDT, obtidos em fase de projecto, juntamente com os resultados obtidos nas medições acústicas finais, após abertura dos espaços ao público.

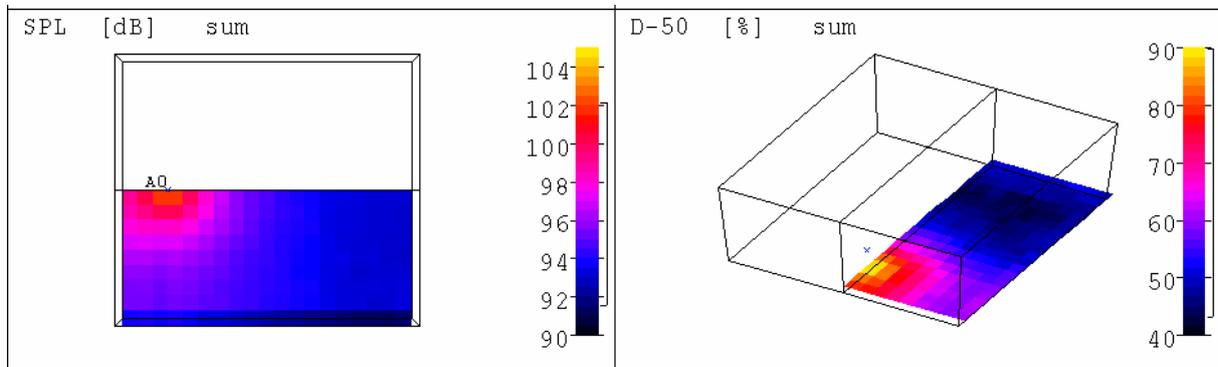


Figura 9 – Mapas com os níveis de pressão sonora (SPL) e com a Definição (D50) obtidos em fase de projecto, para a Capela 3 (apenas para metade da sala, dada a simetria).

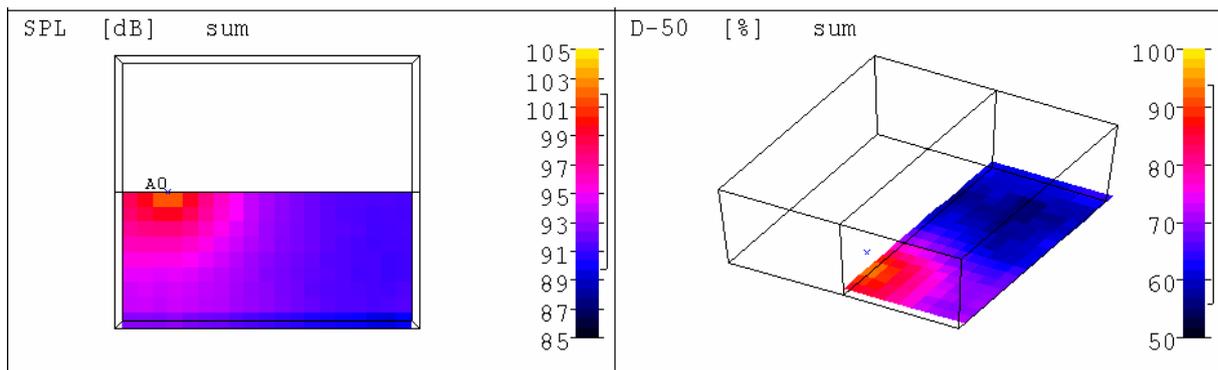
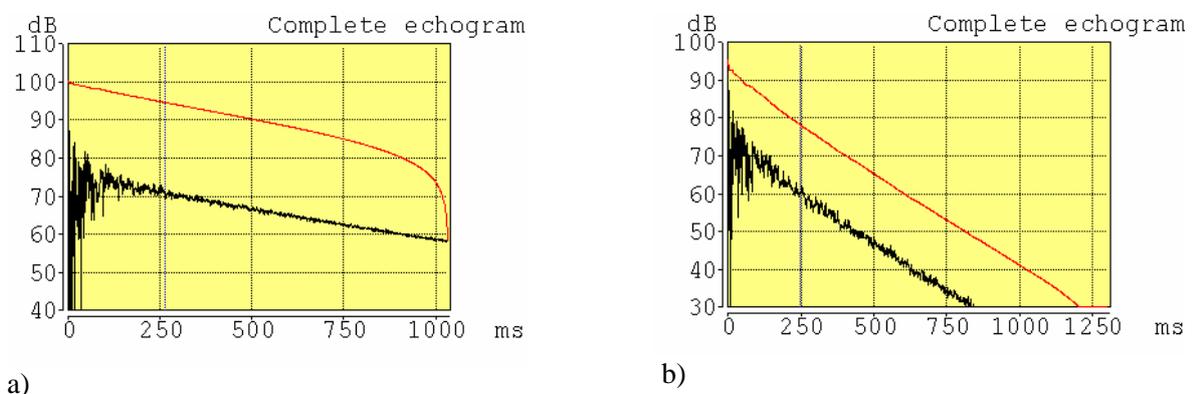


Figura 10 – Mapas com os níveis de pressão sonora (SPL) e com a Definição (D50) obtidos em fase de projecto, para a Capela 4 (apenas para metade da sala, dada a simetria).



a)

b)

Figura 11 – Reflectogramas completos obtidos em fase de projecto, num ponto próximo de RB, para a Capela 3 (a) e para a Capela 4 (b).

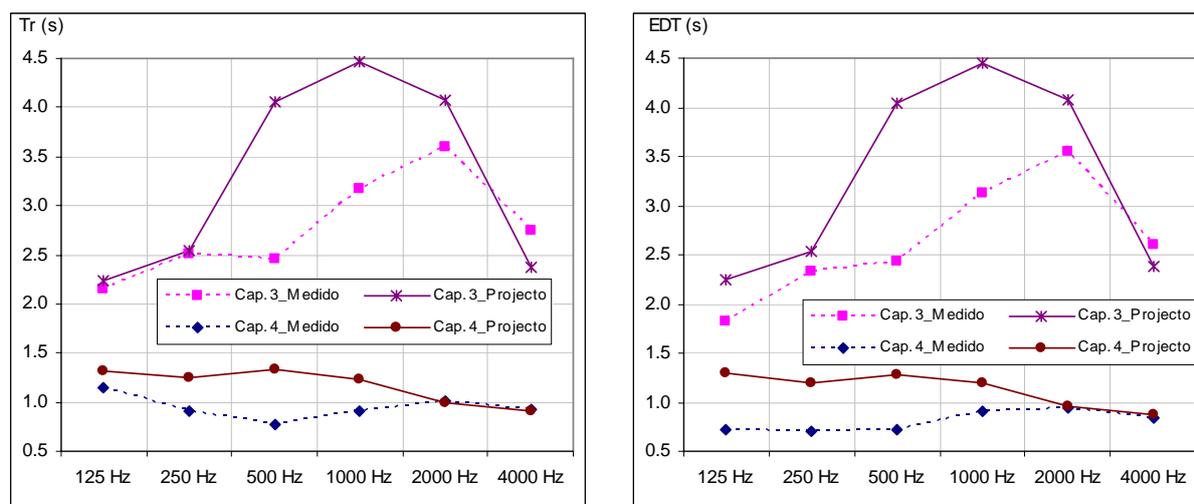


Figura 12 – Tempos de reverberação médios, Tr e EDT, obtidos nas Capelas 3 e 4, em fase de projecto e medidos após abertura dos espaços ao público, em pontos próximos de RB.

5 Análise de resultados

Da análise dos resultados apresentados na Figura 3, é possível verificar que, apesar dos tempos de reverberação médios na Capela 3 não terem variado muito entre a fase inicial, com a envolvente em betão e os pequenos vãos abertos (portas de acesso e zona posterior do altar), e a fase final, com acabamentos e mobiliário já aplicado, o comportamento em frequência foi significativamente alterado. Tal como previsto, e condicionado sobretudo pelo revestimento a gesso cartonado liso, com caixa de ar, os tempos de reverberação baixaram substancialmente em baixas frequências, mas subiram para altas frequências (devido sobretudo à existência de maior rugosidade da envolvente, em especial do piso, durante a fase inicial, de construção, e à contribuição dos vãos abertos). Na Capela 4, graças à grande área de revestimentos fonoabsorventes, em paredes e tecto, os tempo de reverberação baixaram significativamente, em toda a gama audível. Em termos de valor médio, no final, obtiveram-se valores de T próximos de 3,1 s na Capela 3 e de 0,9 s na Capela 4.

Para além das grandes diferenças de reverberação entre as Capelas 3 e 4, após abertura dos espaços ao público, e tal como seria de prever, os índices *RASTI* e *D50* são substancialmente mais favoráveis na Capela 4. Com o recurso ao próprio sistema electroacústico das capelas, obtiveram-se índices médios *RASTI* e *D50* (considerando um valor único correspondente à média dos valores de *D50* obtidos nas bandas de oitava de 500 e 2000 Hz) respectivamente de 48% e 35% na Capela 3 e de 69% e 67% na Capela 4.

Da análise do reflectograma indicado na Figura 6, obtido durante a fase de construção, é possível verificar a existência de várias reflexões com energia próxima ou superior à do próprio som directo, algumas delas com atrasos bastante significativos. Este efeito é ainda mais acentuado nos reflectogramas das bandas de oitava centradas em 125 e 250 Hz (gráficos não apresentados neste artigo, mas avaliados). Após conclusão das obras, e mesmo para o caso mais desfavorável da Capela 3, que manteve aproximadamente o mesmo tempo de reverberação médio, o reflectograma passou a ser mais favorável, com a aplicação das soluções de revestimento e mobiliário.

Em relação ao isolamento sonoro, e apesar de não terem sido efectuados alguns dos ensaios com requisitos de projecto, tendo em conta os resultados obtidos noutros locais do edifício e as soluções construtivas aplicadas, tudo indica que os requisitos de projecto sejam cumpridos. Em relação ao

“ruído de fundo”, devido ao funcionamento dos equipamentos AVAC (equipamento mais relevante), os resultados obtidos permitem concluir que os requisitos são claramente cumpridos na Capela 4 e cumpridos próximo do limite na Capela 3. A grande diferença entre valores de LAr nas duas capelas deve-se, provavelmente, em grande parte às substanciais diferenças de absorção sonora dos revestimentos das capelas, em particular os revestimentos mais próximos das entradas e saídas de ventilação (junto ao tecto).

Da comparação dos resultados previstos em fase de projecto com os resultados finais das medições, e de uma forma global, verifica-se alguma semelhança entre resultados. Contudo, numa análise mais detalhada, é possível verificar pontualmente alguns desvios significativos entre resultados, parte deles justificados por opções tomadas durante a fase de construção, que originaram a alteração de alguns pressupostos iniciais de projecto (motivo pelo qual, não se procedeu a uma comparação exaustiva entre resultados experimentais e de projecto).

6 Conclusões

Conforme inicialmente previsto, e apesar da geometria e aspecto semelhantes, entre as Capelas 3 e 4, o campo sonoro e as características de reverberação são substancialmente diferentes. A Capela 4 apresenta valores médios de tempo de reverberação e índices $RASTI$ próximos respectivamente de 0,9 s e 70%, enquanto que na Capela 3 estes parâmetros médios são da ordem de 3,1 s e 50%, respectivamente.

Apesar dos “parâmetros de qualidade sonora” serem substancialmente mais favoráveis na Capela 4, é necessário não esquecer que a resposta dos utilizadores destes espaços é subjectiva. Para alguns utilizadores destas capelas, nomeadamente oradores, a Capela 3, em comparação com a Capela 4, é considerada acusticamente mais favorável, em especial se não for utilizado o sistema electroacústico. De uma forma geral, esta opinião deve-se, provavelmente, ao facto destes utilizadores estarem muito habituados a ambientes reverberantes, muito mais próximos dos existentes na Capela 3, do que os da Capela 4.

Agradecimentos

Agradece-se ao Santuário da Nossa Senhora do Rosário de Fátima, pela disponibilização de meios e apoio prestado na elaboração deste trabalho.

Referências

- [1] CEN: Acoustics. Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. ISO 3382: 2000.
- [2] Kuttruff, H., *Room Acoustics*, Elsevier Science Publishers, New York, 1991.
- [3] Beranek, L. L., *Concert and Opera Halls – How They Sound*, Acoustical Society of America, New York, 1996.
- [4] PORTUGAL. Leis, Decretos. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, *aprovado pelo Dec. Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio* (em vigor, quer na fase de projecto, quer na fase de avaliação final).